



Fotos: Beckmann, BMW, DLR

Faserverstärktes Titan als **Hochleistungswerkstoff** im Motorsport

Faserverstärktes Titan ist auf Grund seiner außergewöhnlichen Eigenschaften ein idealer Werkstoff für hoch beanspruchte Teile im Motorsport. Selbst hochfeste Stähle können bei einigen Anwendungen durch diesen Werkstoff ersetzt werden. Für dessen Herstellung gibt es die unterschiedlichsten Verfahren, wobei die im DLR entwickelte Faserbeschichtung mittels Magnetronsputtern und anschließendem isostatischen Pressen, das im Motorsport verfahrenstechnisch seit langem Stand der Technik ist, sich als Möglichkeit zur Erzielung bester Materialeigenschaften zeigt. Der Vielfalt zur Herstellung von Bauteilen sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Ausgereifte Prozessführung sorgt dabei für Produkte, die höchsten Qualitätssicherungsstandards genügen.

1 Einleitung

SiC-Langfaser-verstärkte Titanlegierungen, kurz TMC für Titan-Matrix-Composite, sind auf Grund ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften ein idealer Werkstoff für hoch beanspruchte Teile im Motorsport. Für die Herstellung der TMCs wird die SCS-6 Faser (Faserdurchmesser 140 µm) von Specialty Materials, Inc. verwendet [1], **Bild 1** und **Bild 2**. Die extreme Festigkeit der Faser von 4000 MPa und deren Steifigkeit von 380 GPa ermöglichen es, einen Verbund herzustellen, der in Faserrichtung weit über den Eigenschaften herkömmlicher Titanlegierungen liegt. Selbst hochfeste Stähle können bei einigen Anwendungen durch Faser verstärktes Titan ersetzt werden. Herstellungsverfahren wie uniaxiales Heißpressen, Plasmaspritzen oder EB-PVD-Einzelfaserbeschichtung mit anschließender Konsolidierung sind Möglichkeiten, TMCs auf unterschiedliche Weise herzustellen. Jedoch zeigt sich das im DLR entwickelte Verfahren zur Faserbeschichtung mittels Magnetronspultern und anschließendem isostatischen Pressen, das im Motorsport verfahrenstechnisch seit langem Stand der Technik ist, als Möglichkeit zur Erzielung bester Materialeigenschaften. Homogenität und Reproduzierbarkeit sind entscheidende Merkmale, die diese Prozessroute auszeichnen. Der Vielfalt zur Herstellung von Bauteilen sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Sowohl Teile im Kurbeltrieb, Zylinderkopf oder Getriebe, als auch Komponenten im Fahrwerk können in TMC-Ausführung eingesetzt werden. Ausgereifte Prozessführung sorgt dabei für Produkte, die höchsten Qualitätssicherungsstandards genügen.

Schon lange dient der Motorsport auch als Technologieträger für Anwendungen, die heute aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken sind. Er ist eine Plattform mit hohem Potenzial an Innovationen, bei denen Neuentwicklungen ständig auf dem Prüfstand stehen. Gerade im Werkstoffbereich werden Teile bis dicht an der Belastungsgrenze eingesetzt, wobei das Gewicht, die Steifigkeit, die Festigkeit und die tribologischen Eigenschaften eine wesentliche Rolle für einen erfolgreichen Einsatz spielen. Mit SiC-Langfasern verstärkte Titanlegierungen sind ein Beispiel für die erfolgreiche Entwicklung neuer Materialien im Motorsport. Der für den Flugtriebwerksbau konzipierte Werkstoff zeichnet sich durch seine extrem hohe Festigkeit, seine Steifigkeit, seine geringe Dichte von zirka 4 g/cm³ und seine guten Ermüdungseigenschaften aus. Meist jedoch ist die Anbindung oder der Kontakt zum benachbarten Bauteil ein weiterer Punkt, den es bei unterschiedlichen Anwendungen zu überwinden gilt, um die hohen Lasten in das Bauteil hinein zu übertragen.

2 Herstellung

Die Einzelfaserbeschichtung mit anschließender Konsolidierung ist eine Variante zur Erzeugung von Titan-Matrix-Verbunden. Hier unterscheidet man zwischen dem EB-PVD-Verfahren (Physical-Vapour-Deposition) und dem Magnetron-Sputterverfahren. Bei der EB-Beschichtung schmilzt der Elektronenstrahl gezielt die Oberfläche des Titans auf, das sich in einem Tiegel befindet, wodurch sich im Hochvakuum oberhalb des Tiegels eine Titanwolke bildet. Das

Die Autoren



Gerd Hüppen
ist Mitarbeiter der Abteilung Forschung und Entwicklung von Faser-verbundwerkstoffen im Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt in Köln.



Klaus Weber
ist Mitarbeiter der Abteilung Forschung und Entwicklung von Faser-verbundwerkstoffen im Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt in Köln.



Norbert Kreyer
war Leiter der Toyota Motorenentwicklung Formel 1 und ist heute Geschäftsführer von Carbo Systems in Mendig.

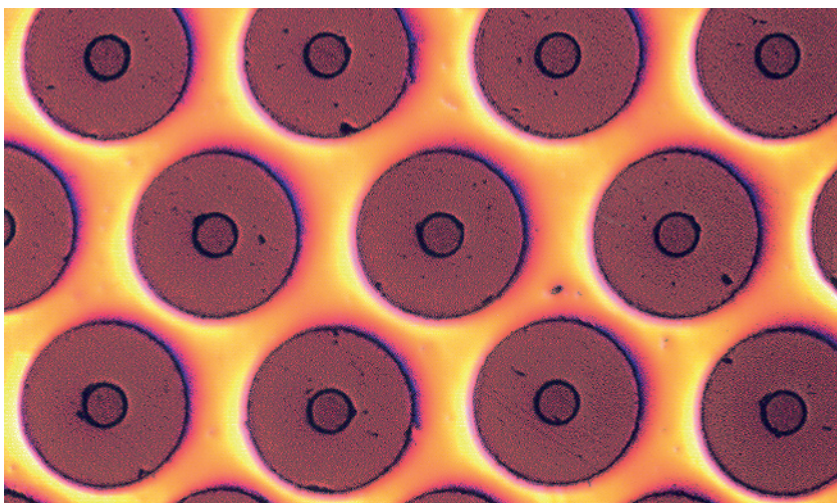


Bild 1: Durch die Beschichtung der SiC-Faser mit Titan ergibt sich nach der Verdichtung der Faserbündel eine hexagonale Anordnung der Fasern (lichtmikroskopische Falschfarben-Aufnahme)

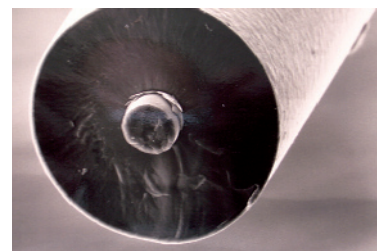


Bild 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Siliziumkarbid-Faser (SCS-6) mit einem Durchmesser von 140 µm

verdampfte Material kondensiert auf der Faseroberfläche und kann je nach Bedarf in unterschiedlichen Dicken abgeschieden werden. Ein kontinuierlicher Prozess ist ebenso möglich wie ein Chargenbetrieb. Von Vorteil sind ein schneller Schichtaufbau und gute reproduzierbare Prozessbedingungen. Nachteilig ist, dass sich Elemente mit niedrigem Dampfdruck stark understöchiometrisch in der Matrix befinden und somit komplexere Legierungen nur schwer aufzubringen sind. Nach der Beschichtung werden die Fasern vakuumdicht in eine Titankapsel eingeschweißt und einem heiß isostatischen Pressvorgang unterzogen [2].

Das im DLR entwickelte Verfahren zur Beschichtung von Fasern mittels Magnetronspattern ist das Verfahren, das die besten Eigenschaften bei den erzeugten Werkstoffen liefert [3]. Dabei wird zuerst die Endlosfaser auf einen Spulenkorb gewickelt und anschließend in die Beschichtungskammer gestellt. Links und rechts des Korbs befindet sich jeweils ein Kathodenpaar mit aufmontierten Targets, von denen das Beschichtungsmaterial abdampft, **Bild 3**. Ionisiertes Argon wird als Trägergas verwendet, das hoch beschleunigt wird und dabei Titan aus der Oberfläche der Targets heraus schlägt. Ein überlagertes Magnetfeld bewirkt, dass das abzuschneidende Material vor der Kathodenoberfläche kanalisiert wird. Dieser Effekt wird durch die Anordnung gegenüberliegender Kathoden zusätzlich verstärkt.

Während des Beschichtungsprozesses dreht sich der Spulenkorb mehrfach durch das Plasma, wobei der Titandampf auf der Faseroberfläche kondensiert. Je nach Anlagenkonfiguration werden derzeit mit dieser Methode Schichtraten bis zu $10 \mu\text{m/h}$ und darüber erreicht. Mit Hilfe dieser Beschichtungstechnologie ist es möglich, den gewünschten genauen Faser volumenanteil in Abhängigkeit von der Beschichtungsdauer gezielt einzustellen. Ebenfalls sind der Schichtaufbau und die Oberflächenstruktur mit Hilfe der Beschichtungsparameter leicht zu beeinflussen, da sie ein wichtiger Bestandteil der Funktionalität des Werkstoffs und der Verarbeitbarkeit sind [4].

Am Beispiel einer Probenfertigung wird dargestellt, wie die einzelnen Fertigungsschritte ablaufen [5], **Bild 4**. Zuerst werden die Fasern von der Spule abgenommen und gebündelt. Anschließend kommt das Faserbündel mit einer möglichst hohen Packungsdichte in eine Probenhülse. Die Hülse ist so präpariert, dass die Oxidschicht keinen weiteren Einfluss auf die Weiterver-

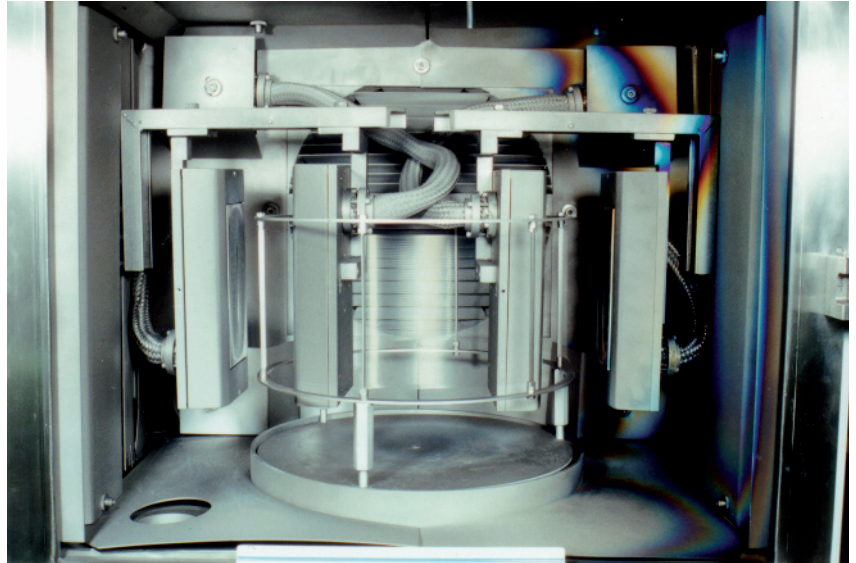


Bild 3: Ein Blick auf die geöffnete Sputteranlage CC800 von CemeCon, bei der die Spule zu erkennen ist, die sich während des Bedampfungsprozesses zwischen den zwei Kathodenpaaren dreht



Bild 4: Ablaufschritte zur Herstellung von TMCs am Beispiel einer Probe: 1. Füllen eines Titanröhrchens mit Fasern; 2. Endkappen aufsetzen und im Vakuum verschweißen; 3. Heißisostatisch pressen; 4. Probenkontur ausarbeiten

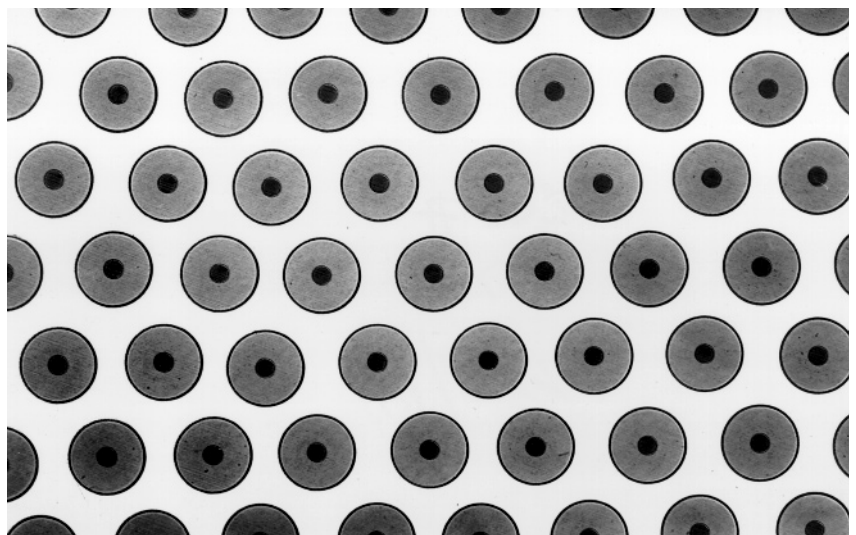


Bild 5: Metallographischer Querschliff eines Probenausschnitts

arbeitung hat. Beidseitig wird das Röhrchen verschlossen und in einer Vakuumkammer mit einem Laser- oder Elektronenstrahl dicht verschweißt. Dieser Vorgang ist für den anschließenden heiß isostatischen Pressvorgang (HIP) von elementarer Bedeutung, da der Werkstoff sonst nicht komprimierbar wäre. Während des Konsolidierens unter Schutzgas bei zirka 900 °C und 150 MPa verdichtet die Titanmatrix über superplastische Verformung zu einem kompakten Verbund. Nach dem HIP-Vorgang ist die Bearbeitung zu unterschiedlichen Probengeometrien wie Zug- oder Ermüdungsproben möglich, um das Material zu charakterisieren, **Bild 5**.

Die vorher beschriebene Prozessführung garantiert so einen optimalen Verbund mit annähernd idealer Faserverteilung und somit reproduzierbaren Werkstoffeigenschaften. Der Vergleich zwischen Faserabstandsverteilungen zeigt direkt einen Unterschied der Herstellungsverfahren, die sich auf die Materialkennwerte positiv oder negativ auswirken. Je schmaler das Streuband der Faserabstände zueinander ist, desto homogener und zuverlässiger sind die Werkstoffeigenschaften. Am Bei-

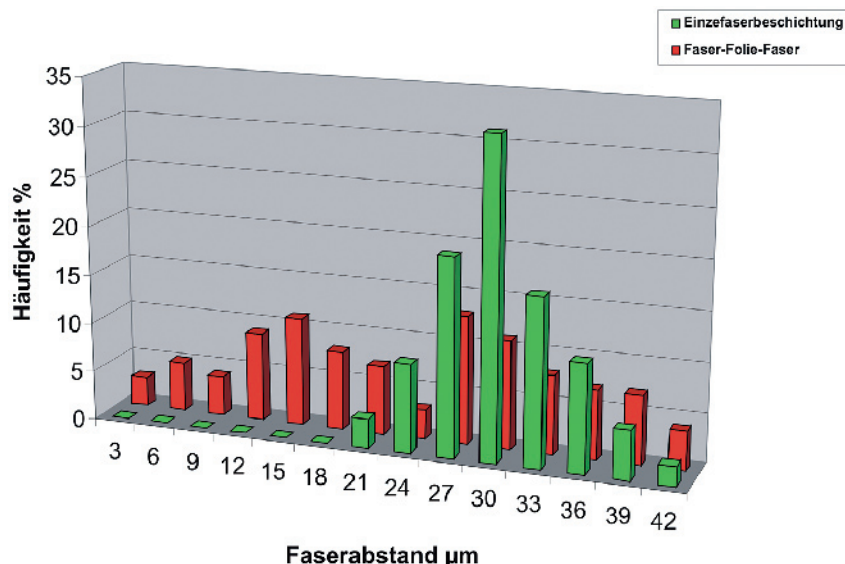


Bild 6: Darstellung der Faserabstandsverteilung zweier TMC-Proben, die durch unterschiedliche Prozessrouten hergestellt wurden.

spiel einer Verteilung über die Faser-Folie-Faser-Prozessroute ist zu erkennen, dass sich die prozentuale Häufigkeit der Abstände nebeneinander liegender Fasern über die ganze Abstandsbandbreite erstreckt,

Bild 6. Dies hat einerseits die Berührung von Fasern, andererseits eine große Distanz zwischen benachbarten Fasern zur Folge, was sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt.

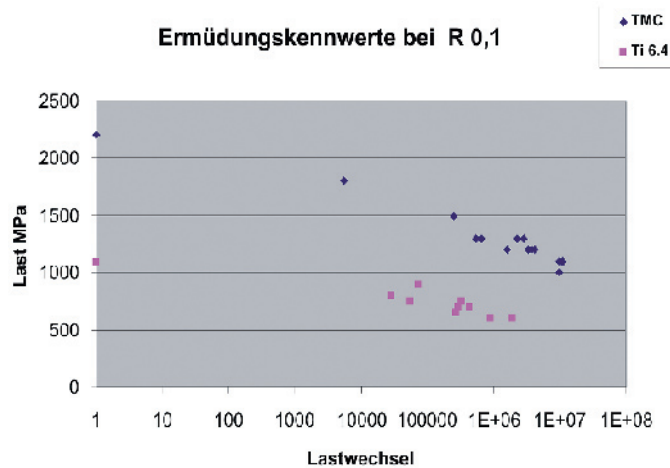


Bild 7: Vergleich der Ermüdungseigenschaften zwischen der Ti6Al4V-Legierung und eines SiC-Faserverbunds bei Raumtemperatur



Bild 8: Stehbolzen, Pleuelbolzen oder Pleuel sind einige Möglichkeiten für faserverstärkte Bauteile

3 Eigenschaften

Durch die Kombination zweier Werkstoffe erhält man bei richtiger Prozessführung eine Mischung der positiven Eigenschaften für den Verbund. Zum einen nutzt man die hervorragende Festigkeit und Steifigkeit der Faser aus, andererseits werden bei den Titanlegierungen die guten, schadens-toleranten Eigenschaften des Metalls verwendet. Betrachtet man die Kraft-Dehnungs-Kurve beim Kraft gesteuerten Zugversuch an einer TMC-Rundprobe mit einem Faservolumenanteil von 38 % und einem Querschnitt von 9,6 mm², so lässt sich feststellen, dass das Materialverhalten zunächst stark faserabhängig ist. Die Gesamtdehnung bewegt sich allgemein im Bereich zwischen 1,2 % und 1,3 %, was man auf eine geringe Bruchdehnung der Faser zurückführen kann, wobei die Spannung beim Bruch auf einem Niveau von 2300 MPa liegt.

Unverstärkte Ti-Legierungen besitzen dagegen nur etwa die Hälfte der Festigkeiten im Vergleich zu verstärktem Titan. Jenes Verhalten der TMCs lässt sich zunächst über die einfache Mischungsregel $\sigma = \sigma_F \times V_F + \sigma_M \times V_M$ beschreiben. Dabei setzt sich die Verbundspannung aus den einzelnen Spannungen der Fasern und der Matrix mit den jeweils dazugehörenden prozentualen Volumenanteilen zusammen. Charakteristisch für den Zugversuch ist die leichte Änderung der Steigung bei zirka 70 % der Bruchfestigkeit. Bei dieser Kraft beginnt die Plastifizierung des Titans, wodurch die Last immer stärker auf die Fasern übertragen wird. Folglich verringert sich bei diesem Lastniveau der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil um rund 15

bis 20 %. Die hohe Bruchfestigkeit des Verbunds lässt auf eine enorme Steigerung der Ermüdungseigenschaften schließen [6], was durch zahlreiche Versuche und unterschiedliche Versuchsreihen bestätigt wurde, **Bild 7**.

Gewöhnlich erreichen hochfeste Titanlegierungen unter Raumtemperatur eine Ermüdungsfestigkeit von maximal 650 bis 700 MPa. Bei verstärkten Ti-Legierungen kann in Faserrichtung das Niveau in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil bis 1200 MPa gesteigert werden. Betrachtet man die Kennwerte im Diagramm, liegen die ermittelten Messpunkte, selbst bei hohen Lasten, in einem sehr schmalen Streuband. Unterhalb der 1100-MPa-Linie erreicht der Faserverbundwerkstoff seine Dauerfestigkeit, wobei die Versuche bei einer Lastspielzahl oberhalb von zehn Millionen abgebrochen und als Durchläufer

gewertet wurden. Somit ist der Werkstoff in Zukunft nicht ausschließlich für höchste statische Belastungen in Bauteilen geeignet, sondern auch für den Einsatz in dynamisch beanspruchten Komponenten.

4 Anwendungen

Sowohl im Rennsport als auch in der Luftfahrt lassen sich heute viele Komponenten durch neue Werkstoffkonzepte ersetzen [7]. Gerade im Kurbeltrieb, in dem hohe translatorische Kräfte auftreten, spielen die Steifigkeit, das Gewicht und die Festigkeit eine maßgebliche Rolle. Aus dem Beispiel Pleuelbolzen, Pleuel und Pleuelstehbolzen geht hervor, dass man bei einer Gewichtsreduzierung um 40 % die gleiche Laufleistung erzielt wie bei einem Stahlbolzen.

Das Wichtigste in Kürze

- Faserverstärktes Titan ist auf Grund seiner außergewöhnlichen Eigenschaften ein idealer Werkstoff für hoch beanspruchte Teile im Motorsport.
- Beim DLR wurde ein Verfahren zur Beschichtung von Fasern mittels Magnetronspütern entwickelt, das beste Eigenschaften bei den erzeugten Werkstoffen liefert.
- Der Vielfalt zur Herstellung von Bauteilen sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Sowohl Teile im Kurbeltrieb, Zylinderkopf oder Getriebe, als auch Komponenten im Fahrwerk können in TMC-Ausführung eingesetzt werden.
- Gewöhnlich erreichen hochfeste Titanlegierungen unter Raumtemperatur eine Ermüdungsfestigkeit von maximal 650 bis 700 MPa. Bei verstärkten Ti-Legierungen kann in Faserrichtung das Niveau in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil bis 1200 MPa gesteigert werden.
- Die hohe Festigkeit der Faser lässt es zu, Teile über den Faservolumengehalt so zu gestalten, dass die mechanischen Eigenschaften, etwa die Biegesteifigkeit, gegenüber Bauteilen aus herkömmlichen Werkstoffen weit übertroffen werden.

Die hohe Festigkeit der Faser lässt es zu, Teile über den Faservolumengehalt so zu gestalten, dass die mechanischen Eigenschaften, etwa die Biegesteifigkeit, gegenüber Bauteilen aus herkömmlichen Werkstoffen weit übertroffen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Ventile, Stehbolzen sowie alle Arten von Schraubverbindungen aus TMC herzustellen [8], **Bild 8**. Außergewöhnliche Ermüdungsfestigkeiten des Materials erlauben es, eine bis heute noch nicht für möglich gehaltene Dimension bei der Auslegung der Befestigungselemente zu erreichen. Pleuelschrauben, Zylinderkopfschrauben in Stehbolzenform oder Zuganker jeglicher Art eignen sich besonders für die Auslegung in TMC-Bauweise, da dort eine gute Lasteinleitung in den Faserbereich erfolgt. Selbst auf Druck belastete Motorkomponenten wie Pleuel oder Ventile sind mit diesem Verfahren herstellbar. Auch hier lässt sich die hohe Druckstabilität der Faser gezielt einsetzen.

Weitere Anwendungen liegen im Bereich der Fahrwerktechnik. Antriebswellen, Drehstabfedern, Bolzen und Schubstangen sind weitere Beispiele für den Einsatz Faser verstärkter Titanlegierungen.

Literaturhinweise

- [1] Prospekt Fa. Speciality Materials, Inc. USA
- [2] Leucht, R.; Dudek, H. J.: Properties of Si/C-fibre reinforced titanium alloys processed by fibre coating and hot isostatic pressing. In: Material Science and Engineering, A188, 1994, S. 201-210
- [3] Leucht, R.; Dudek, H. J.; Weber, K.; Werner, A.: Magnetron Sputtering for Metal Matrix Composite Processing. In: Zeitschrift für Metallkunde, 87 (5), 1996, S. 424-427
- [4] Leucht, R.; Dudek, H. J.; Weber, K.: Additional ductile coatings for processing SiC-fibre reinforced gamma-TiAl alloys. In: Journal of Material Science Letters, 15, 1996, S. 1315-1318
- [5] Leucht, R.; Dudek, H. J.; Weber, K.; Kaysser, W. A.: Processing of SiC-Fibre Reinforced Titanium Parts. In: ECCM-7, 1, 1996, S. 361-336
- [6] Dudek, H. J.; Weber, K.; Assler, H.: Zuverlässigkeit von langfaserverstärkten Metallen. In: Werkstoffwoche 98, 2, 1998, S. 397-402
- [7] Leucht, R.; Weber, K.: Patent Nr. DE 43 35 557; Verfahren zum Herstellen von Langfaserverstärkten Bauteilen
- [8] Hüppen, G.; Leucht, R.; Weber, K.: Patent Nr. DE 198 03 743; Methode zum Aufspreizen von beschichteten Fasern mit einem Keil